

## Аналіз критеріїв оптимізації процесу переміщення гостряків стрілочного переводу постійного струму

С. Г. Буряковський, В. В. Смірнов, Л. В. Асмолова, І. В. Обруч,  
О. О. Рафальський, А. С. Маслій

*Досліджена динаміка переміщення гостряків стрілочного переводу з прямим пуском електродвигуна та регульованим електроприводом постійного струму в середовищі MATLAB. Фокус при моделюванні спрямовано на дослідження процесів, що відбуваються в кінематичних ланках стрілочного переводу в динаміці переміщення його гостряків. Оцінка здійснювалась за критеріями оптимізації процесу переміщення гостряків: імпульс удару гостряка об рамну рейку, пружність сили в робочій тязі та час переводу гостряка. У результаті моделювання нерегульованого електроприводу стрілочного переводу гостряків стало зрозуміло, що значення цих параметрів незадовільні.*

*Математичні моделі регульованого електроприводу стрілочного переводу гостряків розглядались як двомасові електромеханічні системи з підлеглим регулюванням основних координат та за принципом модального керування. Результати математичного моделювання процесу переводу гостряків переконують у тому, що числові значення критеріїв оптимізації процесу регульованого переводу поліпшуються. При збільшенні часу регульованого переводу до 6 % від прямого пуску удар в кінематичних ланках зменшується. При припущенні щодо виключення технологічного зазору в редукторі, зменшення удару гостряків при початку переводу становить 6–8 %. Водночас, порівняння ударів на початку переводу гостряків з урахуванням технологічного зазору в редукторі та без нього показує зменшення амплітуди пружної сили на 250 %. Удар (імпульс моменту гостряків) при закінченні переводу може бути зменшено на 20–24 %.*

*Аналіз критеріїв оптимізації процесу переміщення гостряків показав ефективність регульованого електроприводу у порівнянні із прямим пуском електродвигуна. Це дозволяє не тільки розширити функціональні можливості роботи стрілочного переводу гостряків, а і знизити затрати на поточний технічний огляд, ремонт у цілому, а також збільшення міжремонтного періоду*

*Ключові слова: електромеханічна система, електродвигун постійного струму, система регулювання, критерії оптимізації процесу переміщення*

### 1. Вступ

В теперішній час досить поширено експлуатується електропривод стрілочного переводу на базі двигуна постійного струму з послідовним збудженням. Такі приводи є розімкнутими і некерованими, що призводить до частіших порушень ланок механічної частини стрілочного переводу.

Очевидним є рішення про модернізацію існуючих електроприводів шляхом впровадження нових систем керування в комбінації з наявними електроне-

ханічними системами, які дозволяють регулювати координати струму, швидкості і переміщення. Це сприяє підвищенню ефективності і надійності роботи стрілочних переводів.

Окрім того, експлуатація стрілочного переводу відбувається при різних погодних умовах та різних поєднаннях збурюючих факторів, тому при дослідженні динаміки стрілочних переводів доцільно враховувати усі технологічні особливості конструкції. Такими є зазори, пружності та сили внутрішнього в'язкого тертя, тобто змінне значення коефіцієнта тертя гостряків об перевідні поверхні.

Для ефективного керування процесом переведення гостряків розглядаються системи керування електроприводом за допомогою систем модального та підпорядкованого регулювання. Система з підлеглим регулюванням координат, як найбільш поширена в електроприводах постійного струму, в якій при мінімальному числі зворотних зв'язків успішно реалізується необхідна динаміка і можливість обмеження керованих координат. В системах модального керування від'ємний зворотний зв'язок по будь-якій координаті об'єкта управління, стабілізує цю координату, тобто в тій чи іншій мірі підтримує її сталою при незмінному завданні і впливів, що обурюють всередині контуру. Тому якщо замкнути об'єкт управління, за всіма координатами, які характеризують його стан в будь-який момент часу, то при відповідному підборі значень коефіцієнтів зворотних зв'язків можна отримати бажані характеристики об'єкта управління щодо вихідних координат.

Таким чином, системи підпорядкованого регулювання та з модальним керуванням дозволяють дослідити всю можливу глибину регулювання стрілочного переводу за швидкістю та положенням.

Актуальність роботи полягає в тому, що парк стрілочних переводів містить багато стрілочних приводів із двигунами постійного струму. Це застарілий тип електроприводу, тому є необхідність пошуку засобів підвищення експлуатаційних характеристик таких приводів, в тому числі застосуванням регульованого приводу.

## **2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми**

Пошук засобів підвищення експлуатаційних характеристик та якості роботи стрілочного електроприводу як пристрою залізничної автоматики ведеться декількома напрямками. Такі напрями наукового пошуку стосуються модернізації безпосередньо електродвигуна постійного струму, заміни або застосування нових типів датчиків та механізмів запирання гостряків. Можлива взагалі комплектна заміна на новий (частіш регульований) електропривод із асинхронним, синхронним, лінійним чи вентильно-індукторним типом двигуна. Оскільки на залізницях вагому частину парку стрілочних переводів ще займають пристрої із двигунами постійного струму, то слід приділити увагу, якому із цих напрямів слід віддати перевагу.

Так, в [1] показано, що розширена номенклатура двигунів стрілочних переводів постійного та змінного струмів (МСП-0,1, МСП-0,15, МСП-0,25 та МСТ-0,3; МСТ-0,3а; МСТ-0,3б; МСТ-0,3в и МСТ-0,6; МСТ-0.6а) призводить до значних поточних затрат на утримання та ремонт. Пропонується застосувати єдиний безколекторний двигун типу ДБУ або універсальний вентильно-індукторний двигун із електронним блоком керування ЕМСУ. Доведено еконо-

мічну ефективність такого рішення (зменшення тільки поточних трудовитрат на 40–42 люд/год на станцію із 21 СП за 1 рік). Електронний блок керування дозволяє реалізувати плавний пуск та зупинку двигуна. Також, запропоновано відмовитись від застарілих конструктивних елементів кінематики стрілочного переводу, як фрикційне зчеплення та автоперемикач. Такий напрямок безсумнівно є перспективним та доцільним, проте потребує досить вагомих капітальних вкладень коштів на виробництво, застосування в експлуатацію, оновлення технічної та нормативної документації залізниці чи окремої станції. На відміну від цього дослідження, у [2] застосовується реактивний індукторний триобмоточний електромеханічний перетворювач в якості електронного блоку керування двигуном, проте це тяж шлях, який потребує більших капіталовкладень.

Також в [3] розглянуті питання вдосконалення конструкції і поліпшення характеристик електродвигуна постійного струму, що застосовується в приводах стрілочних переводів. Описано перехідні процеси в режимах пуску та реверсування електродвигунів з електромагнітною і магнітоелектричною системами збудження. Показано перевагу електродвигунів стрілочних приводів з магнітоелектричною системою збудження в порівнянні з експлуатованими на даний час електродвигунами з електромагнітною системою збудження. Але при перевагах такого рішення, значним недоліком залишається прямий пуск двигуна, що призводить до ударів в початку та наприкінці переводу.

В [4] наведено огляд найпростіших рішень з точки зору капіталовкладень – часткова модернізація штатних приводів типів СП-6м шляхом заміни елементів, що найчастіше відмовляють – автоперемикач, фрикційне зчеплення, курбельний механізм та ін. Такий підхід може призвести до поліпшення певних характеристик стрілочного переводу, проте призводить до поширення його номенклатури, що небажано, а також такі приводи мають аналогічні недоліки, притаманні прямому пуску ЕД.

В [5] надано перевагу приводам з електродвигунами змінного струму, за їх високу надійність і зручність в експлуатації. Не дивлячись на це, велика частина переводів на мережі залізниць досі оснащена двигунами постійного струму. Також слід зазначити, що на сортувальних гірках в силу умов технології роботи впровадженню двигунів постійного струму надають перевагу, оскільки їх можна прискорити, подавши 200 % напруги живлення.

Багато уваги приділяється поліпшенню систем управління стрілочним переводом на сенсорній та мікропроцесорній базі, тому в [6] розглянуто доповнення штатного приводу СП-6м технічними засобами бездротового керування (GSM канал) та діагностики елементів привода. В якості технічної платформи застосовано платформу Arduino. Проте незрозумілим залишається ступінь надійності такого рішення, адже GSM канал має бути захищеним та надійним, і в разі його збою може скластися небезпечна ситуація в залізничному русі. Зокрема, застосування техніки та мікроконтролерів типу ELC-12 фірми xLogic (Китай) має замінити такі ненадійні пристрої, як, наприклад, полярізоване реле ОК у двопровідній релейній схемі керування стрілочного переводу. Стосовно цього основного елемента релейної системи керування було проведено моделювання граничних умов його спрацьовування в рамках досліджень для швидкіс-

них залізниць [7], за яким визначено, що для діапазону напруги 62,6...72 В струм ввімкнення може складати 0,4...0,75 А. Це досить чутливий аналоговий пристрій, тому заміна його на цифровий аналог xLogic має бути досліджена більш детально. Заміну існуючих та розробку нових елементів стрілочного переводу досліджено у [8]. Розглянуто побудову математичної моделі, яка б враховувала статичні та динамічні навантаження в елементи стрілочного переводу, та допомагала б такі елементи вдосконалити. Проте в цьому дослідженні недостатньо приділено уваги процесам, що проходять в парі колесо-рейка. Ці процеси розглянуто в [9], де розроблено математичну модель для дослідження процесів, при яких можливий злам елементів механічної частини стрілочного переводу. Проте в цьому дослідженні не приділяється увага таким процесам, як відбій гостряків в кінці переводу, що теж може призводити до виходу із ладу стрілочного переводу. Важливість відслідкування таких процесів показано в [10], де розроблено математичну модель для дослідження динамічних впливів на швидкісних залізницях на мостах, де вимоги до безпеки руху максимальні.

Щодо підвищення відмовостійкості датчиків автоматики стрілочного переводу, які залежні від впливу погодних явищ, зокрема нальоду в зимовий період. Дослідження щодо вузлів автоматики на залізницях, що працюють без нагляду людини [11] вказує на необхідність застосування безконтактних індуктивних датчиків для визначення однозначності положення об'єкта керування для системи керування.

Взагалі, підвищення відмовостійкості забезпечується також системами діагностики, зокрема, розглянутих в [12] оптимальних алгоритмах діагностування, які мають в основі статистичні методи аналізу відмов стрілочних переводів. Існує можливість інтеграції до сучасних цифрових систем керування станціями. Результати цього дослідження можуть бути скомпільовані з результатами дослідження, що розглядається в даній статті, як елементи цифрової системи керування залізничною станцією.

В [13] розглянуто синтез двоконтурної системи підлеглого регулювання швидкості гостряків шляхом застосування тиристорного перетворювача постійного струму. Там же промодельоване попадання стороннього предмету між рамною рейкою та гостряком, та показано здатність системи керування компенсувати вплив на швидкість переводу такого негативного сценарію. Тему цього дослідження має бути розширено, оскільки стрілочний перевід, незважаючи на контроль швидкості у переважній кількості досліджень, має сталі значення переміщення, а саме 154 мм. Цей факт авторами не було розглянуто, адже досліджувалась двоконтурна система керування. Такий недолік призвів до даного дослідження триконтурної системи керування із зовнішнім контуром положення гостряків.

Точність регулювання сучасних цифрових перетворювачів становить 2–0,01 % номінальної швидкості обертання вала двигуна (в залежності від наявності та типу датчика швидкості). Використовуючи методи нелінійного програмування, викладені в [14], та розмістивши нелінійний робастний регулятор положення в програмованому логічному контролері вказані показники точності регулювання можна поліпшити ще більше.

Слід також зазначити, що такий визнаний виробник продукції для залізниць, як Bombardier, має цілу лінійку серійно приводів, що випускаються для

стрілочних переводів із частотним керуванням EBI switch (EBI switch 700, 2000 тощо) [15]. Такі пристрої, до того ж, застосовуються у системі автоматики залізничних станцій EBI Lock цієї компанії, які відкривають перспективи швидкісного залізничного сполучення.

Таким чином, сучасні стрілочні електроприводи повинні гарантовано забезпечувати показники безпеки руху поїздів і бути високонадійними. Необхідно знижувати експлуатаційні витрати на їх утримання шляхом створення необслуговуваних технологій, використання передових технологій виготовлення і сучасних матеріалів. Тенденції досягнення високих швидкостей руху висувають більш жорсткі вимоги до надійності технічних засобів, що забезпечують безпеку руху поїздів по стрілочному переводу. Тому при організації швидкісного руху необхідний новий підхід до розробки стрілочного переводу і електроприводу.

Таким чином, аналіз літературних даних [1–15] висвітив недостатньо приділену увагу в дослідженнях по розширенню функціональних можливостей стрілочного переводу шляхом застосування тиристорного перетворювача разом із експлуатованим двигуном.

Отже, потрібно дослідити, як саме впливає на значення заданих критерії якості роботи стрілочного переводу застосування регульованого електроприводу, за умови, що двигун та вся механічна частина залишаться без змін. У випадку позитивного результату дослідження можна досягнути поліпшення експлуатаційних характеристик стрілочного переводу без суттєвих капітальних витрат.

### **3. Мета і задачі дослідження**

Метою дослідження є визначення шляхів поліпшення динаміки роботи та розширення функціональних можливостей залізничної автоматики засобами регульованого електроприводу. Аналіз має бути виконано на основі рішення задачі мінімізації основних показників якості: час переводу, величин імпульсу удару гостряка об рамну рейку, величина пружної сили в робочій тязі.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

- дослідити динаміку переміщення гостряків стрілочного переводу при прямому пуску електродвигуна в середовищі MATLAB на базі імітаційної моделі стрілочного переводу гостряків, яка враховує пружність кінематичних ланок та нелінійну характеристику навантаження;
- створити, дослідити імітаційні моделі регульованого електроприводу стрілочного переводу з підпорядкованим регулюванням координат та за принципом модального керування і оцінити параметри динаміки переміщення гостряків в різних режимах роботи при плавному пуску;
- виконати порівняльну оцінку чисельних значень критеріїв оптимізації процесу переміщення гостряків і оцінити ефективність роботи регульованих електроприводів стрілочних переводів порівняльно з прямим пуском електродвигуна.

### **4. Дослідження динаміки переміщення гостряків стрілочного переводу при прямому пуску електродвигуна**

Механічна частина стрілочного переводу, кінематична схема якого наведена на рис. 1, розглядається як двомасова електромеханічна система (ЕМС).

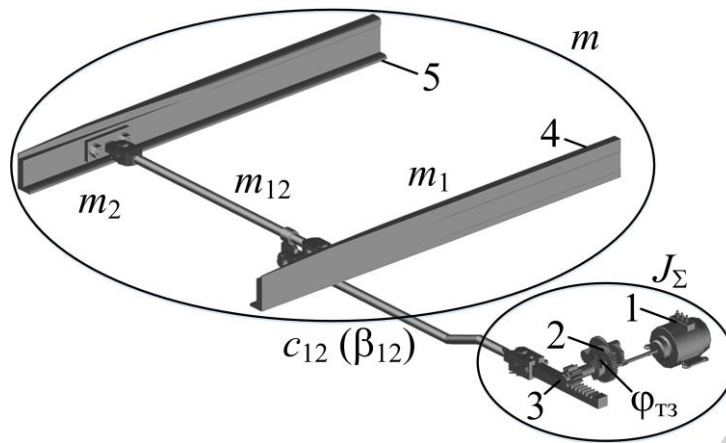


Рис. 1. Кінематична схема стрілочного переводу СП-6м: 1 – електродвигун (ЕД), 2 – редуктор, 3 – шибер, 4 і 5 – перший і другий гостряки відповідно

Її розрахункова схема – на рис. 2. До першої маси з моментом інерції  $J_1$  (якір ЕД  $J_1$  до якого прикладається електромагнітний момент  $M_{\text{дв}}$ , редуктор  $J_p$ , приведений до вала ЕД, який поділяється на момент інерції перших трьох ступенів  $J_{1-3}$  і четвертого ступеня  $J_4$  і шибер) прикладається сила тяги ЕД  $F_{\text{дв}}$ , до другої маси  $m$  (до неї входять маси двох гостряків  $m_1$  і  $m_2$  та міжгострякової тяги  $m_{12}$ ) – сила опору  $F_c = f(v_2)$ .

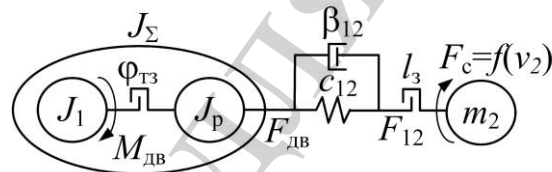


Рис. 2. Розрахункова схема двомасової механічної системи

На рис. 2 також прийняти позначення:  $\varphi_{\text{ТЗ}}=46^\circ$ ,  $l_3$  – технологічний зазор між третім  $J_3$  і четвертим  $J_4$  ступенями редуктора і зазор у місцях з'єднання тяги з шибером і гостряком, відповідно;  $F_{12}$  – пружна сила міжгострякової тяги з коефіцієнтами жорсткості  $c_{12}$  і внутрішнім в'язким тертям  $\beta_{12}$ .

Технологічний зазор необхідний для полегшення пуску ЕД і набору початкової кінетичної енергії з метою зриву гостряків на початку процесу переведення [16]. Роль пружного зв'язку виконує робоча тяга, яка з'єднує шибер із першим гостряком. Перетворення обертального руху вала ЕД в поступальне переміщення гостряків здійснює шибер.

Структурна схема двомасової ЕМС наведена на рис. 3, де  $U_3$  – напруга заведення, В;  $\omega_1$  – кутова швидкість вала ЕД, рад/с;

$$M_{12} = F_{12} \cdot \frac{R_k}{i}$$

$M_{12}$  – пружний момент, Н·м;  $R_k, i$  – радіус колеса і передавальне число редуктора;  $v_1$  і  $v_2$  – лінійні швидкості шибера і гостряків відповідно, м/с.

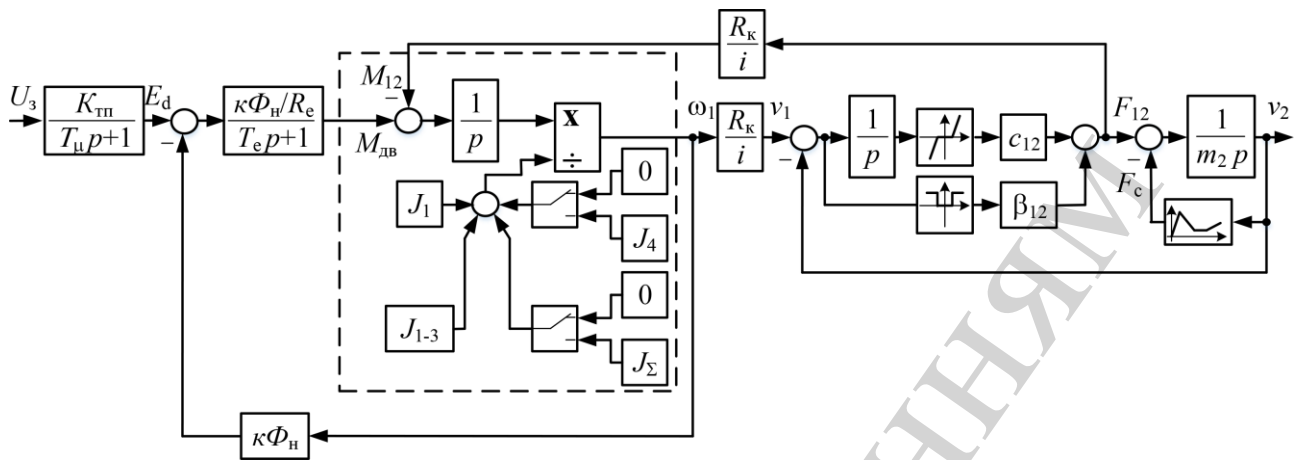


Рис. 3. Двомасова структурна схема стрілочного переводу

У якості ЕД розглядався ЕД постійного струму послідовного збудження. Сила опору є нелінійною  $F_c = f(v_2)$  і знаходиться за виразом:  $F_c = m_2 g f$ , де  $F_c = f(v_2)$  – залежність коефіцієнта тертя  $f$  від лінійної швидкості ковзання відповідної маси  $v_2$ . (рис. 4).

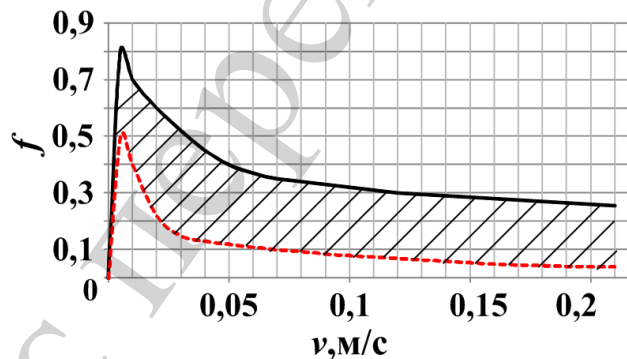


Рис. 4. Діапазон зміни коефіцієнта тертя

Тертя враховується, оскільки стрілочні переводи працюють за різних погодних умов під впливом погодних факторів (опале сухе листя, дощ, сніг тощо). Крім того дозволяє урахувати умови, коли відбувається просідання шпал і зміна геометрії стрілки в цілому. У процесі переведення гостряків стрілочного переводу коефіцієнт тертя поверхонь, що контактують, знаходиться в штрихованій області, обмеженій двома кривими (рис. 4).

Реалізація імітаційної моделі здійснювалась у середовищі Simulink пакету MATLAB з огляду на її зручність, простоту й широкую функціональність.

Моделювання здійснювалось для електродвигуна типу МСП-0,25 при наступних параметрах:  $P_{\text{ном}}=250$  Вт;  $M_{\text{ном}}=1,47$  Нм;  $n_{\text{ном}}=1700$  об/хв.;  $U_{\text{ном}}=160$  В;  $I_{\text{ном}}=2,5$  А;  $R_a=7$  Ом;  $J_{\text{ном}}=0,005$  кг·м<sup>2</sup>;  $\Phi_{\text{ном}}=0,042$  Вб.

Залежність коефіцієнта тертя від швидкості ковзання  $F_c = f(v_2)$  подається апроксимованою характеристикою у вигляді кусочно-лінійної функції [17].

При синтезі системи керування з тиристорним перетворювачем для стрілочного переводу згідно його існуючої розрахункової схеми (рис. 2) було зроблено допущення щодо виключення технологічного зазору в редукторі із кінематичної ланки стрілочного переводу.

Продиктовано це наступним. Необхідність технологічного зазору обумовлена технічною неможливістю створення значного моменту двигуна при пуску. У разі застосування сучасного тиристорного перетворювача така можливість існує, тому доцільним буде виключення зазору, адже його наявність має негативний вплив на ланки кінематичної лінії. На рис. 5, а, б наведені перехідні процеси в кінематичних ланках стрілочного переводу з урахуванням технологічного зазору при прямому пуску електродвигуна і пуску від тиристорного перетворювача. На рис 5, в – при пуску електродвигуна від тиристорного перетворювача без урахування технологічного зазору.

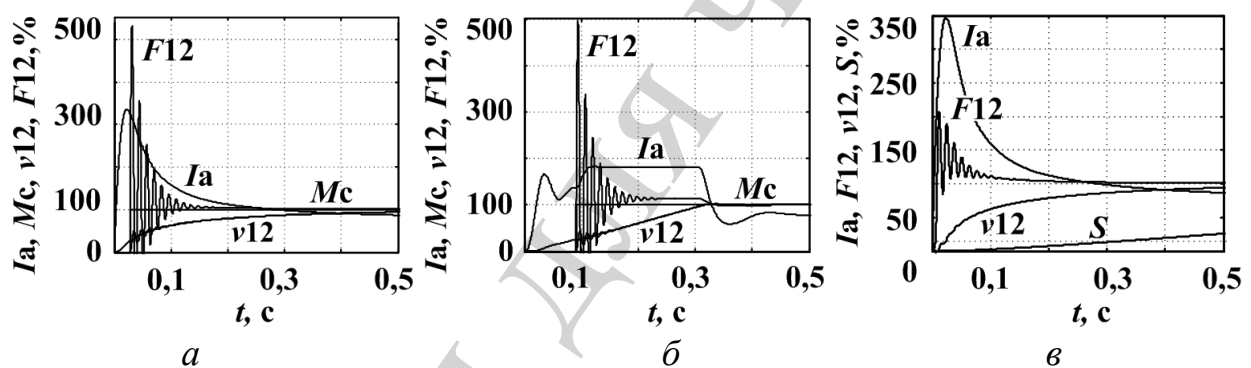


Рис. 5. Перехідні процеси в кінематичних ланках стрілочного переводу: а – при прямому пуску електродвигуна із зазором; б – при пуску електродвигуна від перетворювача із зазором; в – при пуску електродвигуна від перетворювача без зазору

При прямому пуску електродвигуна з урахуванням технологічного зазору значення пружної сили складає 12962 Н (рис. 5, а). Із рис. 5, б, в спостерігається, що при пуску електродвигуна від перетворювача виключення зазору між третьою і четвертою ступенями редуктора приводить до зменшення значень пружної сили майже в 2,5 рази. Значення критерію пружної сили зменшується із 12094 Н до 4367 Н.

Таким чином, з огляду на застосування сучасної техніки, виключення зазору  $\varphi_{\text{тз}}=0^\circ$  із кінематичної ланки стрілочного переводу є доцільним підходом для зменшення удару при зриванні гостряків із місця. Необхідна рушійна сила для цього буде забезпечена застосуванням цифрового тиристорного перетворювача із замкненою системою керування.



Параметри динаміки руху гостряків стрілочного переводу доцільно оцінювати за критеріями [13]:

– час переведення гостряків  $t_s$ , с:

$$t_s = \int_0^{t_3} v(t) dt, \quad (1)$$

де  $t_3$  – заданий час переводу гостряка, с.

– критерій імпульсу моментів гостряків об рамну рейку в кінці переведення  $M_i$ , кг/с. Через велику швидкість гостряків у кінці переведення в результаті удару об рамну рейку відбувається витіснення його назовні. Під час тривалого гальмування відбувається зростання часу переведення, а якщо час гальмування короткий, то не вдається знизити кінетичну енергію до значень, які не призводять до «відбою гостряків». Тому потрібно знайти такий діапазон значень моменту початку гальмування  $t_2$ , котрий при незначному збільшенні часу переведення гостряків забезпечить зменшення величини удару в кінематичній лінії стрілочного переводу. Для оцінки сили удару при зіткненні рухомої маси системи двох гостряків, з'єднаних між собою тягою, об рамну рейку, що перебуває в спокої, вводиться величина, яка чисельно дорівнює імпульсу удару, або імпульсу моменту гостряків:

$$M_i = (m_1 + m_2 + m_{12}) \cdot v_2, \quad (2)$$

де  $m_1$  – маса першої рейки, кг;  $m_2$  – маса другої рейки, кг;  $m_{12}$  – маса міжгострякової тяги, кг;  $v_2$  – лінійна швидкість другої рейки, м/с.

– критерій пружної сили в робочій тязі в процесі переведення  $F_{12}$ , Н.

Внаслідок стрибкоподібного зростання напруги живлення, під час удару в місці кріплення зв'язної тяги при вибірці всіх зазорів, величина пружної сили  $F_{12}$ , різко зростає. Дуже повільне наростання напруги живлення  $U_3$  затягує повний час переведення  $t_s$ . Тому потрібно знайти діапазон таких значень часу розгону  $t_1$ , щоб вони забезпечували мінімум  $F_{12}$  при прийнятних значеннях  $t_s$ :

$$F_{12} = F_d - m \frac{dv_1}{dt}, \quad (3)$$

де  $F_d$  – приведена сила тяги двигуна, Н;  $m$  – сумарна маса рухомої маси, кг;  $v_1$  – швидкість руху шибера, м/с.

Графічне пояснення критеріїв  $F_{12}$ ,  $M_i$  і  $t_s$  за умови прямого пуску ЕД показано на рис. 6.

На рис. 6 видно, що критерій максимуму пружної сили являє собою пікову величину кривої пружної сили, що виникає при старті двигуна. Критерій імпульсу моменту фактично пропорційно змінюється останній абсцисі координати лінійної швидкості гостряків. Так само, критерій часу переводу – то абсциса

останньої точки кривої переміщення гостряків, якій і відповідає час здійснення переводу гостряків.

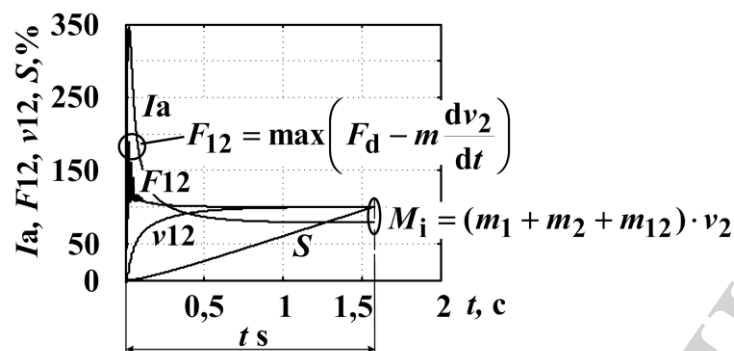


Рис. 6. Графічна ілюстрація критеріїв оптимізації

Так, при пуску електродвигуна від перетворювача без урахування технологічного зазору (рис. 5, в) час переведення гостряків становить  $t_s=1,5754$  с; максимум пружної сили –  $F_{12}=5053,78$  Н; імпульс моменту –  $M_i=214,8511$  кг·м/с.

### 5. Дослідження динаміки переміщення гостряків стрілочного переводу в системі підпорядкованого регулювання положення гостряків в різних режимах роботи

Для залізничної стрілки як об'єкта регулювання у ході реалізації процесу переведення гостряків із одного положення в інше потрібно розглядати замкнуту систему автоматичного керування з від'ємним зворотним зв'язком за положенням. Для розв'язання задач синтезу замкнутих систем електроприводів, що мають високу швидкість і бажаний характер перехідних процесів, найбільш часто використовується метод синтезу послідовної корекції з підпорядкованим регулюванням координат (СПР). В основі цього методу лежить розробка багатоконтурних систем, коли в результаті синтезу кожен із контурів описується передатною функцією і забезпечує оптимальне керування своєю вихідною регульованою координатою за модульним (МО) або симетричним (СО) критерієм оптимальної настройки.

Результати досліджень в [13] показують, що системи підпорядкованого керування положення гостряків мають переваги порівняльно з застосуванням сьогодні прямим пуском по швидкості переводу. Це відображається у стабільності підтримання швидкості та можливості плавного розгону і гальмування.

Функціональна схема електроприводу стрілочного переводу як замкнена двомасова ЕМС, що побудована за принципом підпорядкованого регулювання наведена на рис. 7.

За функціональною схемою настройки контурів регулювання струму та швидкості обертання вала ЕД забезпечує цифровий тиристорний перетворювач, що випускається промислово [DCM, Siemens, DCS, ABB], як стандарт. В ньому реалізована двоконтурна СПР швидкості обертання вала якоря ЕД і вбудовані регулятори струму і швидкості (так звані технологічні), які користувач застосовує і налаштовує відповідно до свого технологічного об'єкта [18].

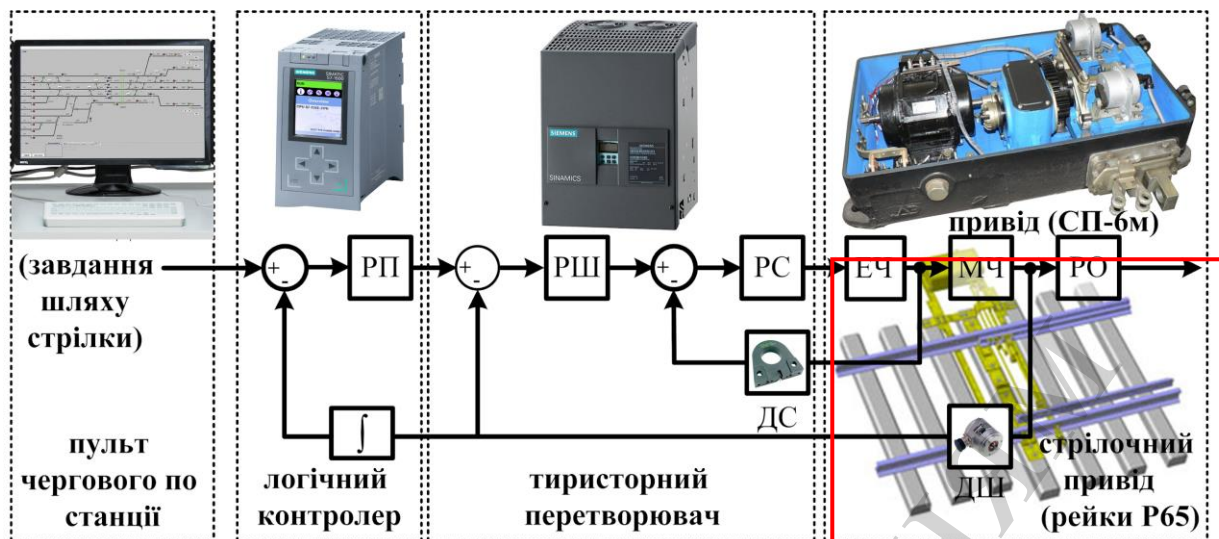


Рис. 7. Функціональна схема електроприводу стрілочного перевodu, побудована за принципом СПР: РП – регулятор положення, РШ – регулятор швидкості, РС – регулятор струму, ЕЧ – електрична частина електродвигуна, МЧ – механічна частина електродвигуна, РО – робочий орган, ДШ – датчик швидкості, ДС – датчик струму

Програмний логічний контролер (PLC) призначений для процесу переведення гостряків із одного положення в інше. У якості датчика положення використовується індукційний датчик положення, на вхід якого поступає сигнал з робочого органу (РО).

Пульт чергового по станції – командний елемент.

За функціональною схемою складена структурна триконтурна СПР електроприводу стрілочного перевodu з урахуванням пружних зв'язків і нелінійної характеристики навантаження (рис. 8).

Для стрілочних переводів вимоги до точності не дуже високі (допустима помилка до 4 мм), а до динамічних характеристик, навпаки, висувають підвищені вимоги, тому контур швидкості налаштовується на модульний оптимум (МО). У контурі струму об'єктом регулювання є якірний ланцюг ЕД, що являє собою апериодичну ланку з коефіцієнтом посилення  $1/R_e$  і великою сталою часу  $T_e$ .

Тиристорний перетворювач, що живить якірний ланцюг ЕД, розглядається як апериодична ланка з коефіцієнтом посилення за напругою тиристорного перетворювача  $K_{тп}$  і малою некомпенсованою сталою часу, яка визначається схемою випрямлення  $T$ .

Датчик струму являє собою пропорційну ланку з передаточною функцією  $W_{дс}(p)=K_{дс}$ .

Регулятор струму являє собою пропорційно-інтегральну ланку (ПІ-регулятор) з передатною функцією:

$$W_{pc}(p) = \frac{R_e \cdot (T_e p + 1)}{\alpha_{мс} T_{\mu} K_{тп} K_{дс} p} = K_{pc} + \frac{1}{T_{ic} p}, \quad (4)$$

де

$$K_{pc} = \frac{R_e T_e}{\alpha_{mc} T_\mu K_{\mu} K_{\mu} K_{dc}}$$

– коефіцієнт посилення регулятора струму;  $\alpha_{mc}=2$  – коефіцієнт налаштування контуру струму на МО;

$$T_{ic} = \frac{\alpha_{mc} T_\mu K_{\mu} K_{\mu} K_{dc}}{R_e}$$

– стала часу інтегрування регулятора струму.

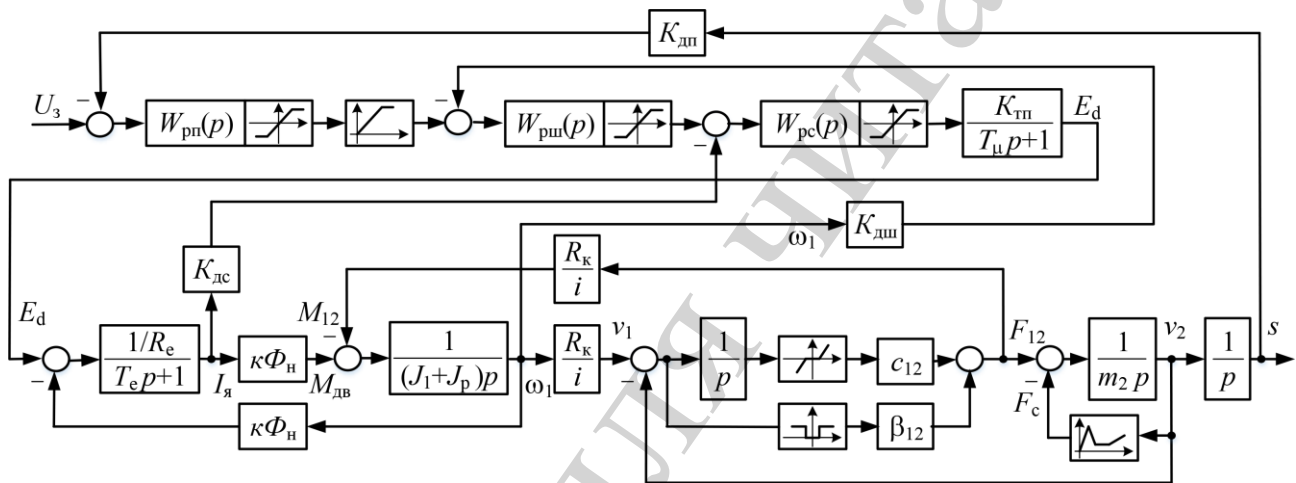


Рис. 8. Структурна схема СПР положення регульованого ЕП стрілочного переводу

Контур швидкості налаштований на МО. У контурі швидкості об'єктом регулювання є механічна частина електропривода стрілочного переводу з передатною функцією

$$W_{mc}(p) = \frac{\kappa \Phi_H}{(J_1 + J_p)p}$$

Замкнений контур струму без урахування зворотного зв'язку по ЕРС описується передаточною функцією другого порядку

$$W_{зам\ кс}(p) = \frac{1}{\alpha_{mc} T_\mu^2 p^2 + \alpha_{mc} T_\mu p + 1}$$

Для синтезу регулятора швидкості зручно використовувати передаточну функцію першого порядку

$$W_{\text{зам кс}}(p) = \frac{1}{\alpha_{\text{мс}} T_{\mu} p + 1}.$$

Датчик швидкості являє собою пропорційну ланку з передаточною функцією  $W_{\text{дш}}(p) = K_{\text{дш}}$ .

Регулятор швидкості являє собою пропорційно ланку (П-регулятор) з передаточною функцією:

$$W_{\text{рш}}(p) = \frac{J_1 + J_p}{\alpha_{\text{мш}} T_{\mu} K_{\text{дш}} K \Phi_n} = K_{\text{рш}} \quad (5)$$

де  $K_{\text{рш}}$  – коефіцієнт посилення регулятора швидкості;  $\alpha_{\text{мш}} = 2\alpha_{\text{мс}}$  – коефіцієнт налаштування контуру швидкості на МО.

У режимі позиціонування система регулювання переміщує робочий механізм у положення, що задаються, і встановлює його в цих положеннях із потрібною точністю (точність позиціонування). Крім точності позиціонування, одним із основних показників якості системи позиціонування є характер перехідного процесу в околі заданої координати і час переміщення в задане положення. Вимагається, щоб перехідний процес в околі заданої координати був аперіодичним, тобто без перерегулювання, а час переміщення робочого механізму з вихідного положення в задане був би мінімізований за рахунок оптимальної форми траєкторії руху.

Характер перехідного процесу при завершенні позиціонування визначається налаштуванням контуру регулювання положення. Формування траєкторії руху між вихідною та кінцевою точками позиціонування здійснюється за рахунок вибору форми регульованих характеристик регулятора швидкості і регулятора положення, а також обмеження значень координат струму та швидкості. Залежно від технологічного процесу система позиціонування може здійснювати малі, середні або великі переміщення; для стрілочного переводу як об'єкта регулювання такими є великі переміщення.

У режимі великих переміщень система працює з обмеженням струму якоря й обмеженням швидкості на допустимому рівні  $\omega_{\text{max}} \leq \omega_{\text{ном}}$ . Обмеження струму якоря й швидкості електродвигуна зазвичай реалізується за рахунок обмеження сигналів завдання напруги струму  $U_{\text{зс}}$  і напруги швидкості  $U_{\text{зш}}$  на виході регуляторів струму й швидкості.

Під час відпрацювання великих переміщень електропривод із максимальним прискоренням розганяється до максимальної швидкості  $\omega_{\text{max}}$  і з цією максимальною швидкістю рухається до заданої координати. При цьому прискорення розгону  $\varepsilon_p = 0$ . У момент, коли сигнал керування на вході регулятора швидкості проходить через нуль, електропривод переходить у режим гальмування, струм якоря і прискорення гальмування  $\varepsilon_t$  стають від'ємними і максимальними. Закінчення позиціонування протікає в лінійній зоні й має загасаючий аперіодичний характер.

Оскільки при налаштуванні контуру положення на МО система є статичною відносно збурювання за моментом, то точність позиціонування залежить

від величини коефіцієнта посилення регулятора положення  $K_{\text{рп}}$  і від моменту опору  $M_0$ . Щоб система точно переміщувала робочий механізм у задане положення, величина коефіцієнта посилення  $K_{\text{рп}}$  визначається співвідношенням:

$$K_{\text{рп}} = \frac{k_0}{K_{\text{тп}}} \sqrt{\frac{4\varepsilon_0 \left(1 + \frac{M_0}{M_{\text{махдоп}}}\right)}{s_{\text{зп}} \left(1 - \frac{M_0}{M_{\text{махдоп}}}\right)}}, \quad (6)$$

де  $\varepsilon_0$  – прискорення гальмування при  $M_0=0$ ;

$$k_0 = \frac{\omega_{\text{ном}}}{s_{\text{зп}} R_{\text{к}}}$$

$k_0$  – коефіцієнт посилення об'єкта;  $K_{\text{тп}}$  – коефіцієнт посилення перетворювача;  $s_{\text{зп}}$  – переміщення гостряків;  $M_{\text{мах доп}}$  – максимально допустимий момент двигуна, що обмежений струмом якоря.

До складу системи керування включений задатчик інтенсивності (ЗІ) для поступового наростання сигналу задавання. Специфікою регулювання положення для об'єкта регулювання, що розглядається, є те, що повністю зупинити рухому рейку не вимагається, оскільки для надійного спрацювання вузла запирання гостряка його необхідно з достатньою силою притиснути до рамної рейки. На переміщеннях з малою швидкістю для цього потрібні значні зусилля, що призведе до значного зростання струму якоря. Для недопущення такого режиму роботи СПР переведення стрілки закінчується не з нульовою швидкістю, а з дещо зменшеною. Величина швидкості під час замикання гостряків, при котрій не відбувається сильного удару об рамну рейку, лежить у межах 20...60 %.

Комп'ютерне моделювання проведено при наступних параметрів об'єкту: регулятор положення:  $K_{\text{рп}}=1,5$ ;  $T_{\text{рп}}=0,7$  с;  $K_{\text{дп}}=649$ ; регулятор швидкості:  $K_{\text{рш}}=30$ ;  $T_{\text{рш}}=40$  с;  $K_{\text{дш}}=0,56$ ; регулятор струму:  $K_{\text{рс}}=0,017$ ;  $T_{\text{рс}}=1,35$  с;  $K_{\text{дс}}=40$ .

У якості вхідного сигналу прийнято скачок різних рівнів до заданої кутової швидкості (100 %, 120 % та 140 % від номінальної швидкості ЕД) при «м'якому» (розгін до номінальної швидкості за 1,0 с) та при «жорсткому» (розгін до номінальної швидкості за 0,4 с) пусках. Отримані осцилограми струму якоря ЕД, швидкості його обертання, переміщення та пружної сили в стаціонарному режимі (рис. 9, 10), в режимі потрапляння спресованого снігу (рис. 11, 12).

З рис. 9 видно, що час переведення гостряків при підвищенні задавання напруги на 40 % пропорційно зменшується з 1,97 с до 1,85 с (тобто на 6 %). При цьому через застосування «м'якого» ЗІ з часом розгону 1,0 с пусковий струм складає  $1,27 I_{\text{н}}$ , що є безсумнівною перевагою цього набору налаштувань СПР, оскільки механічна частина об'єкта регулювання не відчуває перевантажень, а тому, технічне обслуговування можна проводити рідше.

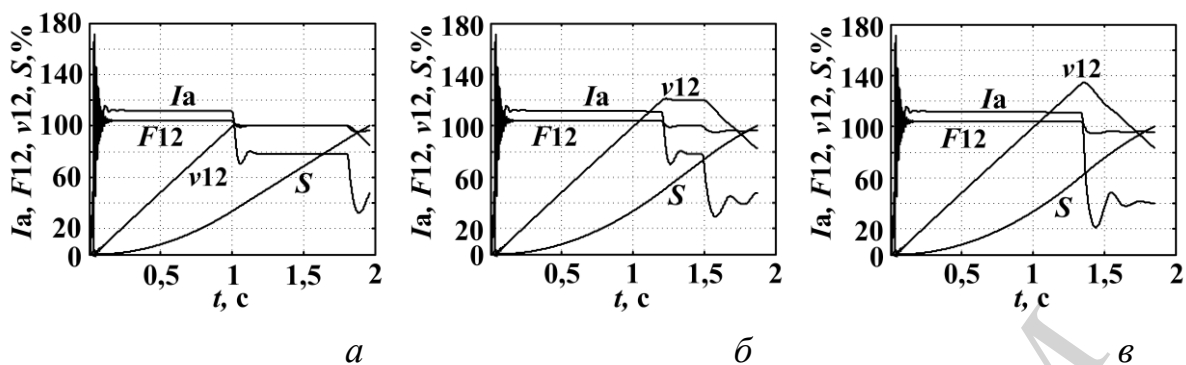


Рис. 9. Часові діаграми струму та швидкості ЕД, переміщення та пружної сили при «м'якому» пуску задатчика інтенсивності в стаціонарному режимі: *а* – 100 %  $\omega_{\text{ном}}$ ; *б* – 120 %  $\omega_{\text{ном}}$ ; *в* – 140 %  $\omega_{\text{ном}}$

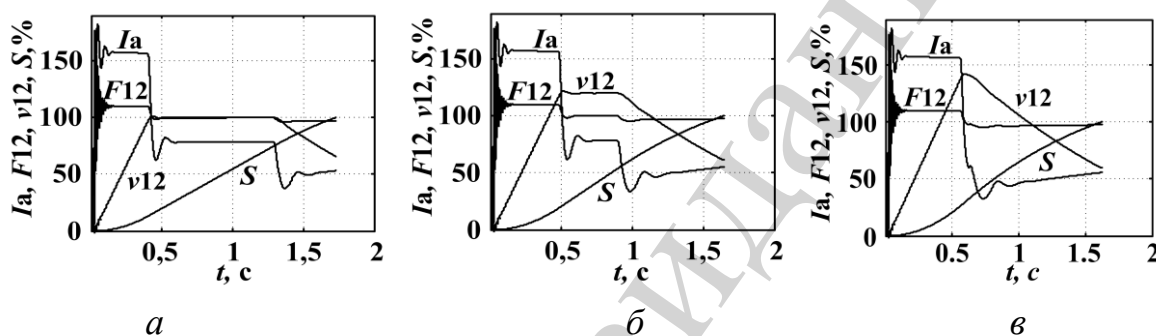


Рис. 10. Часові діаграми струму та швидкості ЕД, переміщення та пружної сили при «жорсткому» пуску задатчика інтенсивності в стаціонарному режимі: *а* – 100 %  $\omega_{\text{ном}}$ ; *б* – 120 %  $\omega_{\text{ном}}$ ; *в* – 140 %  $\omega_{\text{ном}}$

Рис. 10 показує, що у разі необхідності зменшення часу переведення можна встановити час задатчика інтенсивності до «жорсткого» рівня в 0,4 с, що дозволяє домогтися скорочення часу переведення гостряків до 1,62 с. Однак у цьому випадку пусковий струм зростає до  $1,83 I_{\text{н}}$ , що не кращим чином позначається на механічній частині, але в цьому випадку це неминучий недолік, із котрим необхідно миритися.

А значить, шляхом таких налаштувань СПР положення гостряків стрілочного переводу, як час ЗІ й обмеження задавання швидкості можна домогтися скороченням часу переведення на 17 % (з 1,97 с до 1,62 с), обмеживши струм статора при цьому на рівні  $1,83 I_{\text{н}}$ . Це є допустимим рівнем перевантаження для стрілочних переводів електродвигунів, що використовуються на залізниці сьогодні.

На рис. 11, 12 показано, як зміняться координати електропривода стрілочного переводу при потраплянні спресованого снігу між гостряком і рамною рейкою, що характерне для роботи стрілочного переводу в зимовий період. Причому таке потраплення найбільш вірогідне в кінці переведення, коли рухливий гостряк згрібає все накопичене перед ним до рамної рейки. На рис. 13 показана динаміка руху гостряків стрілочного переводу при прямому пуску електродвигуна при чистій перевідній поверхні та при попаданні на неї стороннього предмету.

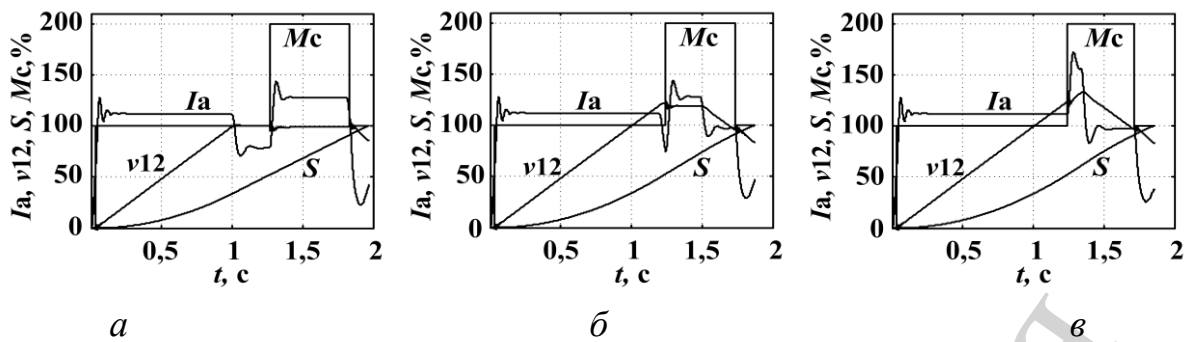


Рис. 11. Часові діаграми струму, швидкості, переміщення та моменту опору в стрілочному переводі при пуску від ТП з СПР («м'який» ЗІ) при потраплянні стороннього предмету (пресованого снігу чи льоду) між рейками: а – 100 %  $\omega_{\text{ном}}$ ; б – 120 %  $\omega_{\text{ном}}$ ; в – 140 %  $\omega_{\text{ном}}$

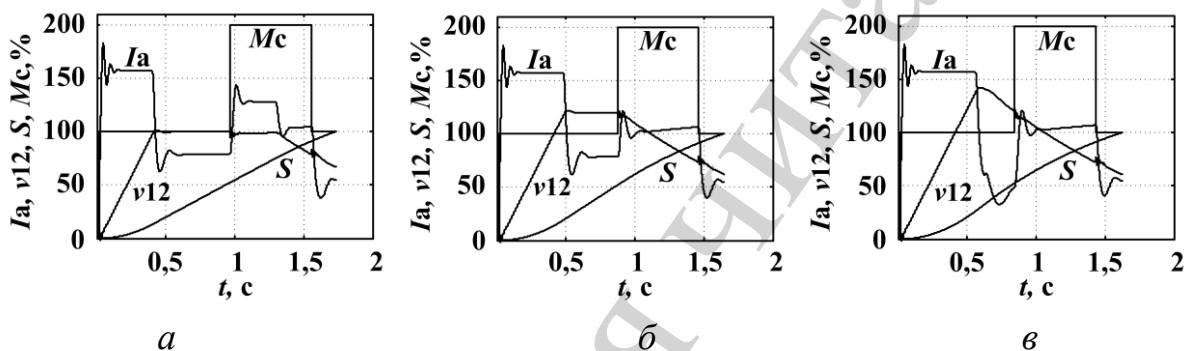


Рис. 12. Часові діаграми струму, швидкості, переміщення та моменту опору в стрілочному переводі при пуску від ТП з СПР («жорсткий» ЗІ) при потраплянні стороннього предмету (пресованого снігу чи льоду) між рейками: а – 100 %  $\omega_{\text{ном}}$ ; б – 120 %  $\omega_{\text{ном}}$ ; в – 140 %  $\omega_{\text{ном}}$

Отже, як видно з рис 13, збільшення моменту опору в 2 рази (моделювання грудки пресованого снігу) незадовго до гальмування не приводить до істотних змін у часі переведення, бо просадка швидкості складає не більше 5 %, а збільшення часу переведення – не більше 1 %. Струм статора при цьому, як у випадку «м'якого», так і «жорсткого» пуску ЗІ, досягає пікової величини в  $2,1 I_n$ , однак це й дозволяє звести до мінімуму просадку швидкості. Тому можна зробити висновок про гарантований час переведення стрілок у зимовий період року, і взагалі, в умовах роботи механіки під відкритим небом. Така характеристика СПР є важливою в умовах швидкісного руху.

Аналіз критеріїв оптимізації процесу переміщення гострих стрілочного переводу при прямому пуску двигуна в порівнянні з результатами дослідження СПР вказує на можливість поліпшити умови роботи ланок кінематичної лінії. При збільшенні швидкості переводу гострих в межах 5 % зменшується час розгону і удар о рамну рейку на початку та в кінці переведення (позначено кольором).



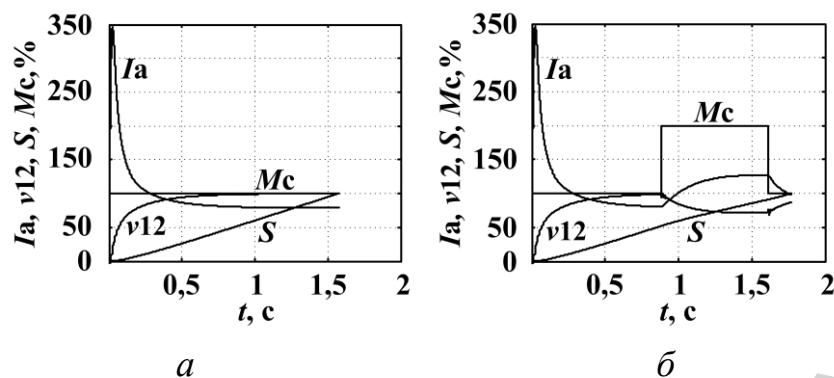


Рис. 13. Часові діаграми струму, швидкості, переміщення та моменту опору в стрілочному переводі при прямому пуску: *а* – при чистій перевідній поверхні; *б* – при перевідній поверхні із льодом

Оцінка критеріїв оптимізації процесу переміщення гостряків для прямого пуску електродвигуна та СПР для кожного випадку наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння критеріїв оцінки ЕМС стрілочного переводу при прямому пуску двигуна (ПП) та в СПР

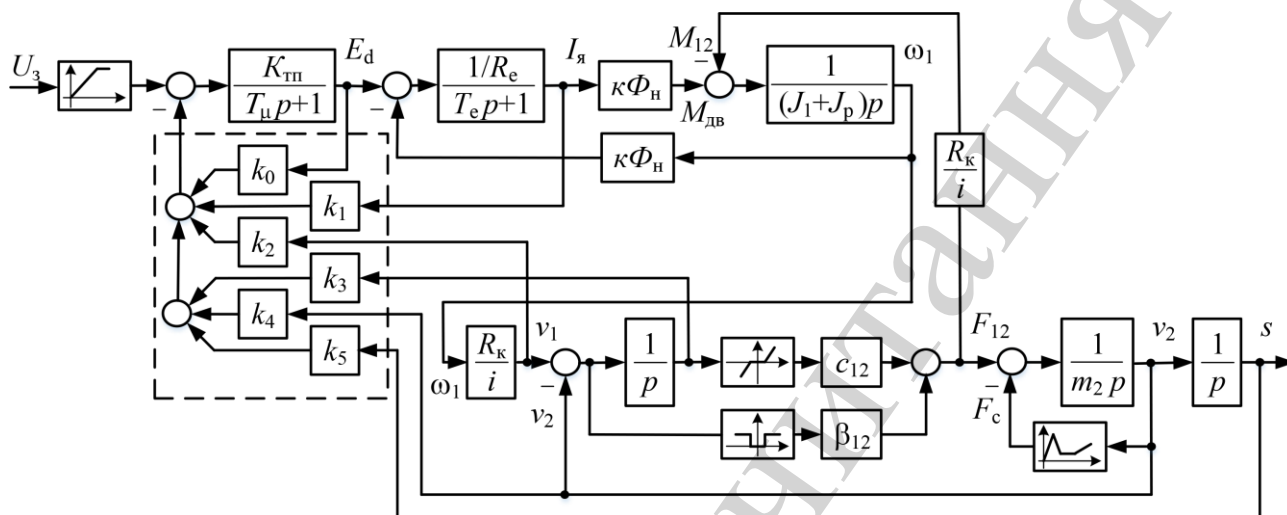
Критерій оцінки ЕМС	ПП	ЗІ, с	СПР		
			100 % $\omega_{\text{ном}}$	120 % $\omega_{\text{ном}}$	140 % $\omega_{\text{ном}}$
час переведення гостряків $t_s$ , с	1,57	1,0	1,96	1,87	1,85
		0,4	1,72	1,64	1,62
максимум пружної сили $F_{12}$ , Н	5054	1,0	4177	4177	4177
		0,4	4302	4302	4302
імпульс моменту $M_i$ , кг·м/с	215,8	1,0	183,2	177,7	179,8
		0,4	141,5	131,3	127,9

## 6. Дослідження динаміки переміщення гостряків стрілочного переводу в системі модального керування положення гостряків стрілочного переводу в різних режимах роботи

До числа основних вимог, які висуваються до електропривода стрілочного переводу, відносяться високі показники надійності роботи, а також точності та швидкодії при керуванні рухом гостряками. Однак для забезпечення потрібної якості керування в системах із пружними зв'язками використання принципів підпорядкованого регулювання координат не завжди ефективне. У зв'язку з цим було поставлено питання про дослідження системи керування електроприводом стрілочного переводу з модальним регулятором (МР), оскільки воно дозволяє визначити бажаний характеристичний поліном системи.

До переваг модального керування відносяться: можливість отримати будь-яке демпфування і швидкодію «в малому» в лінійному електроприводі будь-

На рис. 14 наведена структурна схема стрілочного переводу з модальним регулятором.



При «жорсткому» ЗІ рис. 16 картина дещо змінюється, хоча й істотних відмінностей також не відмічається. Час переводу так само менший, ніж при СПР, на 2-3 %, найменший час досягається при МР і дорівнює 1,58 с. Максимум пружної сили також однаковий при обох системах керування. А ось імпульс моменту при МР за менших значень ЗІ стає меншим від СПР на 12-15 %, оскільки тепер при меншому часі ЗІ система спроможна в той же час, як і при

прямої пуску загальмувати до 50-60 %  $\omega_{\text{НОМ}}$ , знизивши, тим самим, імпульс моменту гостряків при ударі о рамну рейку. При СПР зниження швидкості досягається до рівня 57–62 %  $\omega_{\text{НОМ}}$ .

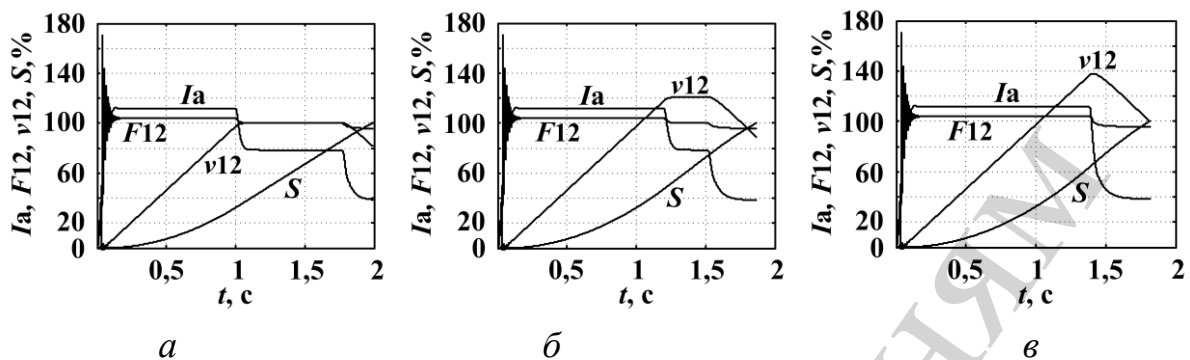


Рис. 15. Часові діаграми струму та швидкості ЕД, переміщення та пружної сили при «м'якому» пуску від задатчика інтенсивності в стаціонарному режимі: а – 100 %  $\omega_{\text{НОМ}}$ ; б – 120 %  $\omega_{\text{НОМ}}$ ; в – 140 %  $\omega_{\text{НОМ}}$

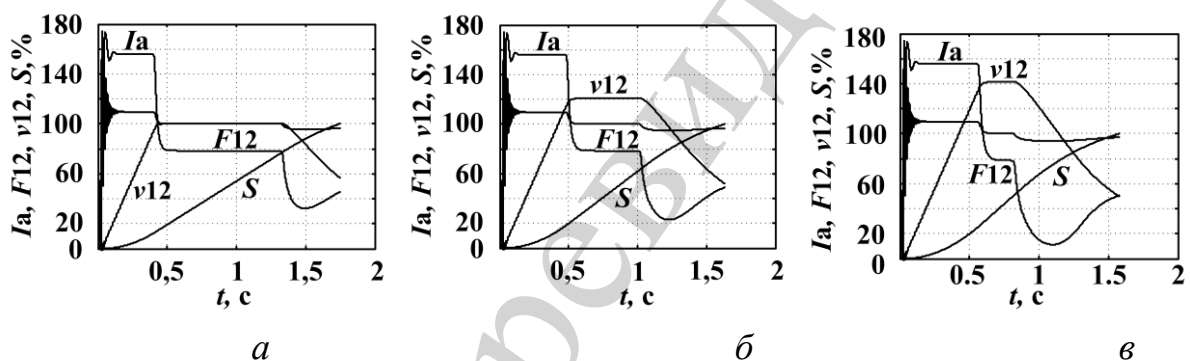


Рис. 16. Часові діаграми струму та швидкості ЕД переміщення та пружної сили при «жорсткому» пуску від задатчика інтенсивності в стаціонарному режимі: а – 100 %  $\omega_{\text{НОМ}}$ ; б – 120 %  $\omega_{\text{НОМ}}$ ; в – 140 %  $\omega_{\text{НОМ}}$

Потрапляння снігу між рейкою і гостряком рис. 17, 18 також, як і системі з СПР, не приводить до суттєвих змін під час переведення, бо просадка швидкості складає не більше 5 %, а збільшення часу переведення – не більше 1 %.

Оцінка критеріїв оптимізації процесу переміщення гостряків при прямому пуску електродвигуна і для системи з модальним регулятором для кожного випадку наведена в табл. 2.

Аналіз порівняння критеріїв оптимізації процесу переміщення гостряків стрілочного переводу при прямому пуску двигуна з модальною системою керування вказує на таку ж саму тенденцію, що в СПР. Спостерігається зменшення часу розгону і удар гостряків о рамну рейку на початку та в кінці переведення гостряків при збільшенні швидкості в межах 5 % (позначено кольором).

Системи з синтезованим модальним регулятором мають незначну перевагу перед СПР. Це відображається в зменшенні часу переводу та (при певних пара-

метрах ЗІ) зменшенні імпульсу моменту, а також меншій амплітуді координат швидкості і струму в нестационарних режимах.

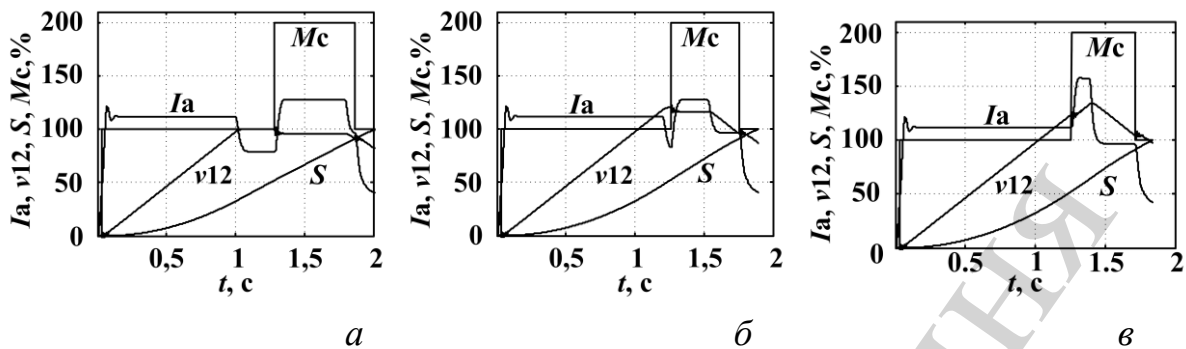


Рис. 17. Часові діаграми струму, швидкості, переміщення та моменту опору в стрілочному переводі при пуску в системі з модальним регулятором («м'який» ЗІ) при потраплянні стороннього предмету (пресованого снігу чи льоду) між рейками: а – 100 %  $\omega_{\text{ном}}$ ; б – 120 %  $\omega_{\text{ном}}$ ; в – 140 %  $\omega_{\text{ном}}$

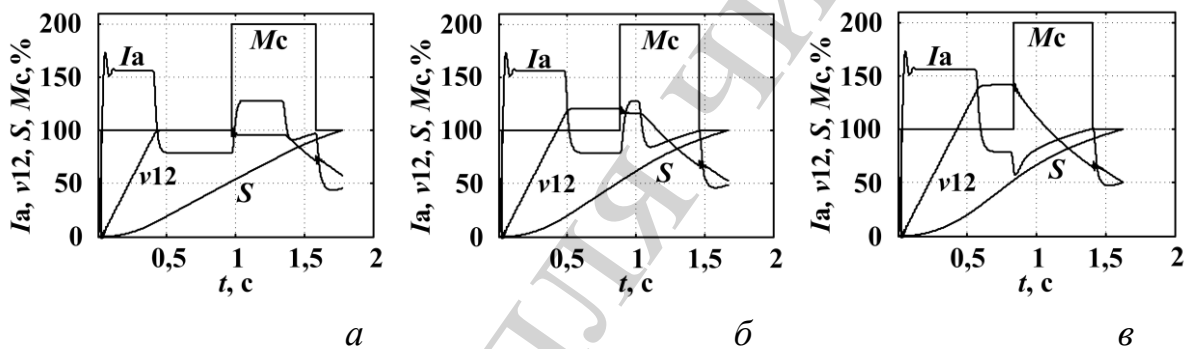


Рис. 18. Часові діаграми струму, швидкості, переміщення та моменту опору в стрілочному переводі при пуску в системі з модальним регулятором («жорсткий» ЗІ) при потраплянні стороннього предмету (пресованого снігу чи льоду) між рейками: а – 100 %  $\omega_{\text{ном}}$ ; б – 120 %  $\omega_{\text{ном}}$ ; в – 140 %  $\omega_{\text{ном}}$

Таблиця 2

Порівняння критеріїв оцінки ЕМС стрілочного переводу при прямому пуску двигуна (ПП) та в системі з модальним регулятором

Критерій оцінки ЕМС	ПП	ЗІ, с	Система з модальним регулятором		
			100 % $\omega_{\text{ном}}$	120 % $\omega_{\text{ном}}$	140 % $\omega_{\text{ном}}$
час переведення гостряків $t_s$ , с	1,57	1,0	1,99	1,86	1,81
		0,4	1,74	1,63	1,58
максимум пружної сили $F_{12}$ , Н	5054	1,0	4155	4155	4155
		0,4	4257	4257	4257
імпульс моменту $M_i$ , кг·м/с	215,8	1,0	175,3	191,2	215,1
		0,4	122,5	111,8	106,5

## 7. Оцінка чисельних значень критеріїв оптимізації процесу переміщення гостряків в регульованих електроприводах стрілочних переводів порівняльно з прямим пуском електродвигуна

Для оцінки якості процесу переведення доцільним є візуальне порівняння показників якості розглянутих систем керування (рис. 19, 20).

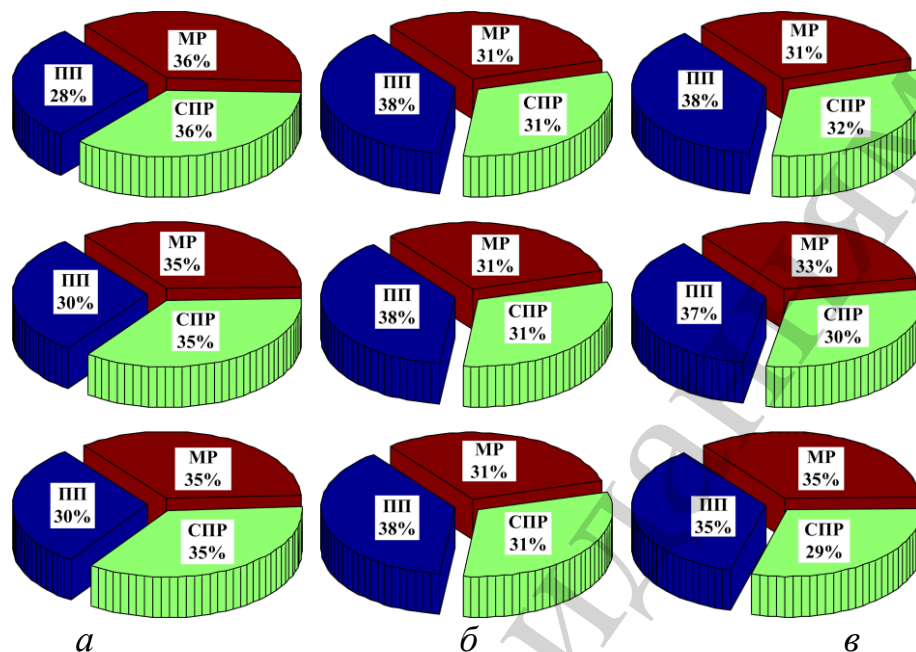


Рис. 19. Порівняння критеріїв оцінки ЕМС стрілочного переводу при «м'якому» ЗІ при різних значеннях завдання швидкості: *а* –  $t_s$ , с при 100 %, 120 %, 140 % від  $\omega_{ном}$ ; *б* –  $F_{12}$ , Н при 100 %, 120 %, 140 % від  $\omega_{ном}$ ; *в* –  $M_i$ , кг·м/с при 100 %, 120 %, 140 % від  $\omega_{ном}$

Аналіз рис. 19, 20 показує, що застосування регульованого електропривода стрілочного переводу з двигуном постійного струму, згідно з визначеними вище критеріями якості, може поліпшити якість процесу переведення стрілки. Так, при «м'якому» ЗІ, тобто більш плавному старті та зупинці, очевидне зниження величини імпульсу удару і пружної сили (6–8 % і 5–6 % відповідно); при цьому час переведення збільшується на 5–8 %. Підвищення швидкості наростання завдання та рівня швидкості переведення гостряків дає більш виразний результат: зниження величини імпульсу удару і пружної сили сягають 20–24 % і 5–6 %, при збільшенні часу переводу на 0,5–1 %.

Таким чином, основні показники критерію оцінки ефективності роботи покращились: знизилась величина імпульсу удару гостряка  $M_i$  на 20–24 %, знизилась величина пружної сили  $F_{12}$  в тязі на 5–6 %, час переводу  $t_s$  зріс на 5–8 % для завдання номінальної швидкості та на 0,5–1 % для завдання швидкості на 40 % вище від номінальної швидкості.

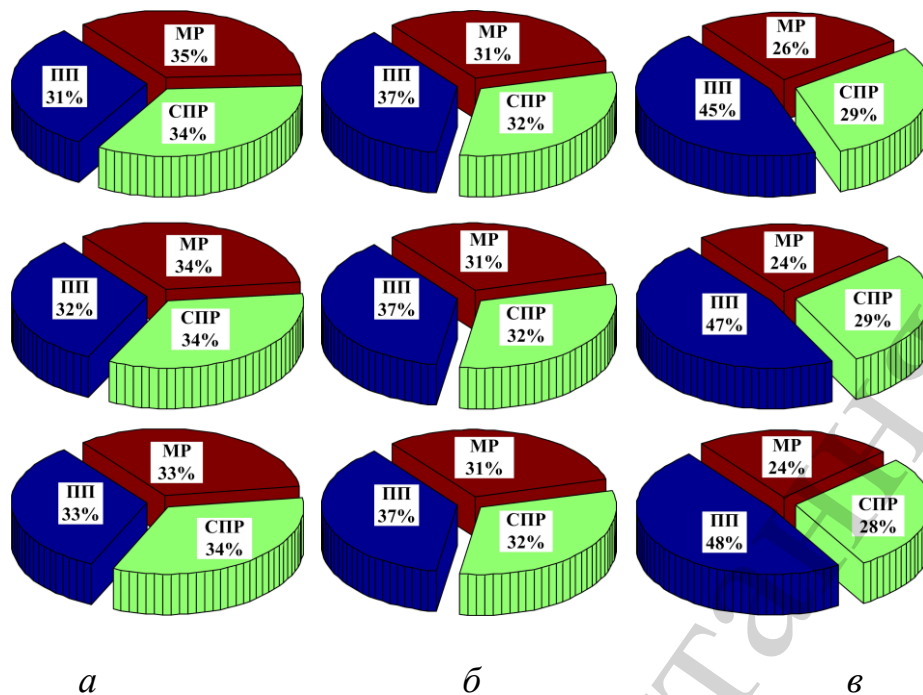


Рис. 20. Порівняння критеріїв оцінки ЕМС стрілочного перевodu при «жорсткому» ЗІ при різних значеннях завдання швидкості: *а* –  $t_s$ , с при 100 %, 120 %, 140 % від  $\omega_{ном}$ ; *б* –  $F_{12}$ , Н при 100 %, 120 %, 140 % від  $\omega_{ном}$ ; *в* –  $M_i$ , кг·м/с при 100 %, 120 %, 140 % від  $\omega_{ном}$

## 8. Обговорення результатів дослідження динаміки переміщення гостряків стрілочного перевodu, що досліджувалися

Дослідження динаміки переміщення гостряків при прямому пуску електродвигуна в середовищі MATLAB показали, що урахування технологічного зазору необхідного при прямого пуску електродвигуна не потрібно при пуску електродвигуна від тиристорного перетворювача (рис. 5). Сучасні тиристорні перетворювачі надають можливість забезпечити значний момент двигуна на початку процесу переведення гостряків, що призводить до зменшення значень пружної сили майже в 2,5 рази. Тому надалі доцільно досліджувати системи без урахування технологічного зазору в кінематичних ланках.

При дослідженні динаміки переміщення гостряків стрілочного перевodu в регульованому електроприводу з підпорядкованим регулюванням координат та з модальним керуванням тиристорний перетворювач, що живить якірний ланцюг електродвигуна, представлено аперіодичною ланкою першого порядку.

Система підпорядкованого регулювання координат, на відміну від раніше досліджених систем регулювання швидкості, доповнена контуром положення. Завдяки контуру положення можна спостерігати за процесом позиціонування гостряків (рис. 8).

Система з модальним керуванням координат також доповнена контуром за положенням, що дозволяє визначати бажаний характеристичний поліном для отримання необхідного характеру перевodu гостряка (рис. 14).

Для обох систем забезпечувався плавний пуск від задатчика інтенсивності з різним часом розгону до номінальної швидкості та обмеженням задавання кутової



швидкості. Імітаційне моделювання виконувалось для штатної роботи стрілочного переводу та в умовах потрапляння пресованого снігу або льоду між рейками. При моделюванні спостерігалось обмеження струму статора на рівні  $1,27 I_n$ , що є перевагою, оскільки механічна частина об'єкта регулювання не відчуває перевантажень, а тому, технічне обслуговування можна проводити рідше (рис. 11, 12).

Аналіз якості роботи електропривода стрілочного переводу оцінювався за критеріями оптимізації процесу переміщення гостряків. Порівнювалися чисельні значення імпульсу удару гостряка об рамну рейку, пружність сили в робочій тязі та час переводу гостряка в регульованих електроприводах з прямим пуском електродвигуна. Отримані результати показують високу ефективність використання сучасних систем керування для управління процесом переведення гостряків (табл. 1, 2, рис. 19, 20). Знизились величини імпульсу удару гостряка на 20-24 %, а пружної сили в тязі на 5-6 %. Час переводу гостряків збільшився на 5-8 % при завданні номінального значення швидкості та на 0,5-1 % при задаванні швидкості на 40 % більше від номінальної. За результатами оцінки визначається доцільність ефективності роботи стрілочного переводу при використанні того чи іншого виду регульованого електроприводу в порівнянні з існуючим стрілочним переводом.

Переваги проведених досліджень надають певну свободу подальшого вибору системи керування, оскільки отримані результати мають приблизно однаковий результат за критеріями оптимізації процесу переміщення гостряків. Дослідження показали достатню адаптацію регульованого електроприводу до умов роботи приводів стрілочних переводів в процесі штатної роботи та в умовах потрапляння пресованого снігу або льоду між рейками.

До недоліків можна віднести відсутність практичного експерименту.

Дане дослідження систем керування стрілочними переводами є продовженням теми застосування тиристорного перетворювача у складі стрілочного переводу із двигунами постійного струму. На відміну від раніше досліджених систем регулювання швидкості, в даній статті досліджено системи регулювання положення. Подальший шлях розвитку досліджень – вивчення системи регулювання положення із приводом змінного струму.

Результати дослідження будуть корисні при розробках технічного переоснащення існуючих стрілочних переводів із прямим пуском на регульований привід постійного чи змінного струмів. Застосувати осцилограми та порівняльні таблиці цього матеріалу можна при проектуванні нових електроприводів стрілочних переводів, а також, при пуско-налагоджувальних роботах з регульованим приводом в якості довідникових значень параметрів перетворювача.

## 9. Висновки

1. Дослідження динаміки переміщення гостряків стрілочного переводу при прямому пуску електродвигуна надали значення критеріїв оптимізації: час переведення гостряків 1,5754 с; максимум пружної сили 5053,78 Н; імпульс моменту 214,8511 кг·м/с. Такі дані стали базовими для подальшого порівняння. Пуск електродвигуна від перетворювача забезпечує виключення технологічного зазору та зменшує удари в кінематичних ланках на початку та вкінці переводу гостряків. Це призводить до зменшення значення критерію пружної сили із 12094 Н до 4367 Н.

2. В динаміці переміщення гостряків в системах регульованого електропривода стрілочного переводу постійного струму (СПР та модальне керування положенням гостряків) суттєвих відмінностей не визначено. Час переводу гостряків відрізняється не більше 5 %. Динаміка регульованого процесу переводу відзначається зменшенням величини ударів, про що свідчить зменшення значень критеріїв пружної сили та імпульсу моменту.

3. Порівняння чисельних значень критеріїв оптимізації процесу переміщення гостряків вказує на позитивний ефект зменшення максимуму пружної сили від системи із прямим пуском на 6–8 %, а якщо врахувати зазор в кінематичній ланці, то на 250–270 %. Зменшення імпульсу удару гостряка від системи із прямим пуском складає 20–24 %. Негативний ефект збільшення часу переводу збільшується за рахунок плавного пуску та гальмування, не більше, як на 5–8 %. Оскільки збільшення часу переводу є незначним, а зменшення пружної сили та імпульсу моменту є досить суттєвими, можна зробити висновок про ефективність роботи регульованих електроприводів стрілочних переводів порівняльно з прямим пуском електродвигуна.

## Література

1. Матвеева, О. Л., Селиверов, Д. И. (2013). Исследование экономической эффективности замены в стрелочных приводах электродвигателей постоянного тока на универсальные электродвигатели. Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сб. ст. по мат. VIII студ. междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск, 63–74. URL: <http://sibac.info/archive/technic/8.pdf>
2. Буряковский, С. Г., Любарский, Б. Г., Петрушин, А. Д., Маслий, А. С. (2011). Математическое моделирование вентильно-индукторного двигателя для привода стрелочного перевода. Електротехнічні та комп'ютерні системи, 3, 157–158.
3. Абусеридзе, З. В. (2010). Электродвигатель с магнитоэлектрической системой возбуждения в приводе стрелочного перевода. Электричество, 10, 56–60.
4. Матвеева, О. Л., Селиверов, Д. И. (2012). Электроприводы для железнодорожных стрелочных переводов. Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сб. ст. по мат. VII междунар. студ. науч.-практ. конф. Новосибирск, 79–91. URL: <http://sibac.info/archive/technic/7.pdf>
5. Богатырь, Ю. И. (2009). Анализ существующих методов и средств управления стрелками и сигналами на железнодорожных станциях. Информ.-керуючі системи на залізн. трансп., 4, 60–65.
6. Орунбеков, М. Б., Наурызбай, Д. К. (2018). Разработка системы GSM управления удаленных объектов железнодорожной автоматики и телемеханики на платформе ARDUINO. Инновационное развитие науки и образования: сб. ст. по мат. II Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. Пенза, 122–125.
7. Масленников, Е. В., Горб, П. Э., Сердюк, Т. Н., Иванов, А. В. (2013). Стрелочные привода скоростных железнодорожных магистралей. Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті, 5, 63–82. URL: [https://www.researchgate.net/publication/292995753\\_Switch\\_motors\\_of\\_speed\\_railway](https://www.researchgate.net/publication/292995753_Switch_motors_of_speed_railway)



8. Lagos, R. F., San Emeterio, A., Vinolas, J., Alonso, A., Aizpun, M. (2014). The Influence of Track Elasticity when travelling on a Railway Turnout. Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. doi: <https://doi.org/10.4203/ccp.104.208>
9. Kaewunruen, S. (2014). Monitoring structural deterioration of railway turnout systems via dynamic wheel/rail interaction. Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation, 1, 19–24. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csndt.2014.03.004>
10. Chen, R., Ping, W. (2012). Dynamic Characteristics of High Speed Vehicle Passing over Railway Turnout on Bridge. Advanced Materials Research, 455-456, 1438–1443. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.455-456.1438>
11. Shirao, S., Rojatar, D. (2016). A Review - Automatic Railway Gate Control System. International Journal of Scientific Research in Science, 2 (6), 681–684.
12. Ефанов, Д. В., Хорошев, В. В. (2018). Оптимизация алгоритмов диагностирования железнодорожных стрелочных электроприводов с учетом статистических данных об отказах. Транспорт Урала, 1, 19–25. doi: <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2018-1-19-25>
13. Буряковский, С. Г., Маслий, Ар. С., Рафальский, А. А., Смирнов, В. В. (2016). Применение системы подчиненного регулирования положения остряков на базе эксплуатируемого стрелочного перевода постоянного тока. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2 (117), 47–51.
14. Kuznetsov, B. I., Nikitina, T. B., Kolomiets, V. V., Bovdyj, I. V. (2018). Improving of electromechanical servo systems accuracy. Electrical Engineering & Electromechanics, 6, 33–37. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2018.6.04>
15. Environmental Product Declaration. URL: <https://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/supporting-documents/Sustainability/Reports/BT/Bombardier-Transportation-EPD-EBI-Switch-2000-en.pdf>
16. Мойсеєнко, В. І., Лазарєв, О. В. (2010). Удосконалення методу визначення стану та ресурсу пристроїв залізничної автоматики. Зб. наук. праць. Донецький інститут залізничного транспорту, 21, 63–70.
17. Buriakovskiy, S., Maslii, A., Maslii, A. (2016). Determining parameters of electric drive of a sleeper-type turnout based on electromagnet and linear inductor electric motor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (1 (82)), 32–41. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75860>
18. Sinamics DCM DC Converter. URL: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/240/109478240/att\\_851818/v1/manual-DC-Converter\\_en.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/240/109478240/att_851818/v1/manual-DC-Converter_en.pdf)